

文章编号:1671-8879(2019)05-0039-09

多损伤场景下大跨径斜拉桥易损性

薛晓锋¹, 靳启文², 王通行¹

(1. 长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450001)

摘要:为了研究大跨径双索面斜拉桥易损斜拉索部位,进一步优化结构健康监测传感器布置方案,基于大跨径斜拉桥结构特点及受力性能,以斜拉桥主梁屈服安全系数和应力安全系数为评价指标,以大跨径全漂浮分立柱式塔四索面分离式钢箱梁斜拉桥为依托,采用有限元分析软件,分别采用 Beam4 梁单元和 Link10 桁架单元模拟塔/梁构件和拉索构件,建立该斜拉桥的三维有限元空间模型;计算分析了拉索整体性能退化、单根断索、单对断索 3 类损伤场景下 149 个工况的主梁屈服安全系数和应力安全系数。分别考虑结构损伤比例和所造成损伤程度,采用 Pareto 多目标评价方法,根据结构最小损伤比例作用所造成结构损伤程度最大的优化原则,分别研究了 3 类损伤场景下斜拉索的易损性,确定了易损斜拉索的部位。研究表明:成桥拉索索力随着索长的增加而逐渐增大,内侧索力基本大于外侧索力;拉索整体性能退化程度从无损伤到损伤增加至 30%,主梁屈服安全系数呈线性增大趋势,应力安全系数呈线性减小趋势,但二者变化幅度均较小;单根断索或者单对断索损伤场景下,易损拉索为中跨 10[#]、边跨 6[#],较易损拉索为 1[#]~5[#]、7[#]~9[#]等。该结果可为研究双塔双索面钢箱梁斜拉桥斜拉索的易损薄弱部位,布控长期监测传感器和提高结构安全性提供科学依据和参考。

关键词:桥梁工程;拉索性能退化;结构易损性;大跨径斜拉桥;分离式钢箱梁;结构健康监测

中图分类号:U446.2 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.005

Structural vulnerability of long-span cable-stayed bridge subjected to multiple damage scenarios effect

XUE Xiao-feng¹, JIN Qi-wen², WANG Tong-xing¹

(1. Key Laboratory of Bridge Detection Reinforcement Technology, Ministry of Communications, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: To study the vulnerability of the cable-stayed bridge with long span and double cable planes, and optimize the sensor placement for structural health monitoring (SHM), the structural characteristics and mechanical properties of this type of bridge were considered. The buckling and stress safety factors were selected as evaluation indexes. One floating long-span cable-stayed bridge with split column towers and split steel box girders and four cable was considered as an example, and the finite element model was established, and towers/girders

收稿日期:2019-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51808052);国家重点研发计划项目(2016YFC0701400)

作者简介:薛晓锋(1976-),女,河南许昌人,副教授,工学博士,E-mail: xuexiaofeng@chd.edu.cn.

通讯作者:靳启文(1986-),男,河南许昌人,讲师,工学博士,E-mail:jqw.sinx123@163.com.

component, and cables component were simulated by elements Beam4 and Link10, respectively. The buckling safety factor and stress safety factor of the main beam under 149 working conditions in the three types of damage scenarios, such as overall performance degradation, single cable and single-pair cable broken, were calculated and analyzed. The proportion of structural damage and the corresponding damage degree were also considered. According to the principle that the minimum damage ratio causes the largest damage degree, the vulnerable cable subjected to three kinds of damage scenarios were studied and determined based on the Pareto optimization method. The results show that the cable force increases gradually with an increase in cable length, and the interior cable force inside is usually greater than that at the exterior. The overall performance degradation of the cable increases from non-damage to damage to 30% of the main girder. The buckling safety factor of the main girder show a linearly increases, while the stress safety factor show a linearly decreases, both the change range of them are small. Under single cable broken and single pair cable broken scenarios, cables 10[#] and 6[#] (both outside and inside) are the most vulnerable scenarios, and cables 1[#] to 5[#] and cables 7[#] to 9[#] follow. It can provide scientific basis and reference for the vulnerable parts of cables study of double tower and double cable planes steel box girders, sensor placement of this kind of bridge, and structural safety can be further enhanced. 2 tabs, 14 figs, 28 refs.

Key words: bridge engineering; performance degradation of stay cable; structural vulnerability; long-span cable-stayed bridge; separated steel box girder; SHM

0 引言

大跨径桥梁多采用柔性结构体系,结构设计规模较大、受力复杂,建造及服务周期较长,期间受恶劣自然环境侵蚀、外部荷载以及人为破坏等不利因素影响,结构容易出现不同程度的损伤积累,潜在危险性突出。尤其是近年来,公路桥梁拉、吊索断裂安全事故频发^[1-3],亟需计算确定结构关键易损薄弱部位并布置传感器加强监测。

结构易损性通常是指结构在特定条件下的敏感性和脆弱性,它揭示结构自身弱点所在^[4-5]。早期的结构易损性研究主要集中于其概念理解方面,如 20 世纪 70 年代, Greenspon 就指出结构易损性取决于其保持正常服役所能承受的最大变形,即易损性表征结构的塑性变形和破坏^[6]。Tassios 将结构易损性分析视为快速适用的整体评价技术,并给出了某结构的地震承载能力评估方法^[7]。20 世纪 90 年代, Agarwal 等提出了基于结构几何拓扑构成的结构易损性分析思想,并指出结构易损性分析的目的是找出结构的薄弱连接,而非结构荷载作用下的响应理论^[4]。

近年来,结构易损性分析概念得到了很大程度的丰富和完善^[8],一些针对性的结构分析和评估工作也逐渐展开。Ghali 等研究了一座多跨刚架桥发生局部破坏后的不同破坏结果,指出不合理的静力结构形式将会增大结构发生连续倒塌的易损性^[9]。

Starossek 根据结构破坏传播方式,对结构连续倒塌进行了详细分类、对比分析^[10]。Blandford 总结了二维、三维桁架结构的连续倒塌分析方法及桁架结构预防静力或动力连续倒塌策略^[11]。Abdelnaby 分析了 Tohoka 主余震作用下钢筋混凝土框架体系的易损性,指出多次地震对钢筋混凝土框架的脆弱性有显著影响^[12]。Hwang 等针对钢筋混凝土桥梁结构,提出了考虑地面运动、局部场地条件以及桥梁物理特性的不确定性地震易损性曲线获取方法^[13]。李立峰等研究了中等钢筋混凝土连续梁桥系统脆弱性,指出该类型桥梁的支座比墩柱、桥台更容易遭受地震破坏,尤其是桥台处活动支座^[14-16]。Wang 等以一座连续梁式钢筋混凝土桥为例,指出余震会显著增加连续桥梁的抗震需求和脆性,而对于中度损伤脆性,考虑累积损伤时余震的影响更大^[15]。林庆利等指出基于地震原始调查数据生成的经验易损性曲线会与实际地震易损性有偏差,并基于补充后的汶川地震公路桥梁经验易损性曲线,分析了桥型和桥梁规模对易损性的影响^[18]。Li 等指出当建筑物受到高强度主冲击时,结构的倒塌能力会显著降低,即主震之后只要有一个小的余震,结构也有可能倒塌^[19]。胡思聪等基于易损性研究了常用减震控制方式在高墩多塔斜拉桥结构中的减震效果,指出受高墩影响斜拉桥的支座系统、主梁和拉索的损伤概率显著增加,而索塔损伤相对轻微^[20-22]。

目前,结构易损性已经从早期的概念理解和结

构分析评估逐渐延伸至工程应用领域,其应用范围也从早期的结构工程的倒塌、地震响应等方面逐渐延伸至桥梁结构健康监测领域,即通过结构的易损性分析找到其薄弱位置,进而更有针对性的布置监测传感器。Huang 等用结构易损性分析对汀九大桥的健康监测系统进行了优化设计^[23]。Wong 开展了以青马大桥为依托的大桥危险性和易损分析^[24]。于刚提出以损伤场景造成的后果及其占结构规模比例为基础的两参数易损性量化分析方法,并分析了 1 座 5 跨单索面斜拉桥结构的易损性,对其结构健康监测系统进行了设计^[25]。李彦兵以李家沱长江大桥为依托,研究了该桥在不同拉索断裂工况下的主梁线形、应力、索力的变化情况,进而提出了考虑拉索损伤的健康监测方案^[1]。

综上所述,在混凝土结构、钢结构的易损性研究方面取得了很大成就,但以健康监测为目的的易损性分析研究还处于起步阶段,对双肢独塔四索面分离式钢箱梁斜拉桥的易损性研究鲜有报道。为此,本文以斜拉桥主梁屈曲安全系数和应力安全系数为评价指标,采用 Pareto 多目标优化方法,分别考虑拉索整体性能退化、单根断索、单对断索 3 类损伤场景对主梁结构性能的影响程度;依托大跨径分肢柱式塔四索面分离式钢箱梁斜拉桥,计算分析了该类大跨斜拉桥的易损薄弱部位。本研究成果不仅可进一步丰富和完善结构易损性分析方法,也可用来分析结构的易损薄弱部位,并以此作为结构长期监测重点,具有重要工程应用意义。

1 基本方法

1.1 结构性能指标

斜拉桥主梁结构直接承担着车辆荷载,并将其通过拉索传递给主塔进而传递至大地,属典型压弯构件,可考虑主梁的屈曲安全和应力安全,以此展开分析。

1.1.1 主梁屈曲安全系数

参考轴向受压构件稳定分析理论,考虑主梁轴向力作用,并以其屈曲安全系数作为性能评价指标,沿拉索等间距将其分为若干两端铰接的弹性支撑连续梁,采用受压构件 Engesser 近似方法进行计算分析,拉索间主梁单元屈曲示意图 1^[5,26]。图 1 中: P_{cr} 、 Q 、 a 分别为 xOy 坐标下单元的临界轴力、横截面剪力、长度; y_0 为竖向挠度最大值。

考虑到斜拉桥主梁弹性模量 $E(x)$,截面惯性矩 $I(x)$ 以及拉索支承等效弹性介质系数 $\beta(x)$ 均是主

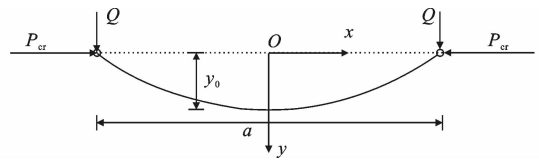


图 1 拉索间主梁单元屈曲示意

Fig. 1 Main girder element's buckling

梁水平坐标 x 的函数,可将斜拉桥主梁内稳定临界轴力 $N_{cr}(x)$ 表示为

$$N_{cr}(x) = 2 \sqrt{E(x)I(x)\beta(x)} \quad (1)$$

临界轴力 $N_{cr}(x)$ 与该处实际轴力 $N(x)$ 之比即为该单元的名义屈曲安全度,其最小值即为加劲梁屈曲安全系数 λ ,表达式为

$$\lambda = \min\{N_{cr}(x)/N_{dmax}(x)\} \quad (2)$$

式中: $N_{dmax}(x)$ 为拉索性能退化时主梁 x 截面的最大轴力(考虑动力冲击)。

1.1.2 主梁应力安全系数

考虑主梁竖向弯矩作用,以应力安全系数作为性能评价指标,参照斜拉桥拉索容许应力计算^[27],有

$$[\sigma] \leq 0.4R^b \quad (3)$$

式中: $[\sigma]$ 为拉索容许应力; R^b 为拉索抗拉标准强度。

对式(3)进行数学变换,可得其安全系数为

$$\frac{R^b}{[\sigma]} \geq 2.5 \quad (4)$$

参照式(4),以 μ 、 σ_{cr} 分别表示主梁应力安全系数和容许应力, σ_{dmax} 表示损伤场景作用下考虑动力冲击影响的主梁应力,可得主梁应力安全系数为

$$\mu = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{dmax}} \quad (5)$$

本文在分析拉索单根断裂和单对断裂损伤场景时,考虑其对主梁冲击相对较小,故取值 1.2。

1.2 多目标优化分析

令参数 C_{IDS} 、 M_{IDS} 分别表示拉索损伤对结构性能的影响程度以及损伤拉索所占的规模比例;参数 P 、 A 分别表示结构性能指标和结构构件面积。损伤场景对结构性能影响程度变化可按式计算^[13,23]

$$C_{IDS} = \frac{P - P_{DS}}{P} \quad 0 \leq C_{IDS} \leq \frac{P - \bar{P}}{P} \quad (6)$$

$$M_{IDS} = \frac{A_{DS}}{A} \quad (7)$$

式中: P_{DS} 、 A_{DS} 分别为拉索损伤场景发生后的结构性能和损伤面积; \bar{P} 为满足结构正常使用的基本

性能。

由式(6)、式(7)可知,结构易损性分析即找出损伤规模 M_1 尽可能小、破坏后果 C_1 尽可能高的损伤场景。人们通常采用 Pareto 方法对双参数甚至多参数进行最优分析,如图 2 所示。可令 $F_1 = 1 - C_{IDS}$ 且 $F_2 = M_{IDS}$,即假设以 2 个条件 F_1 、 F_2 约束下的资源分配,不能出现在不损伤 F_1 (F_2) 的情况下使得约束条件 F_2 (F_1) 得到更好的满足。

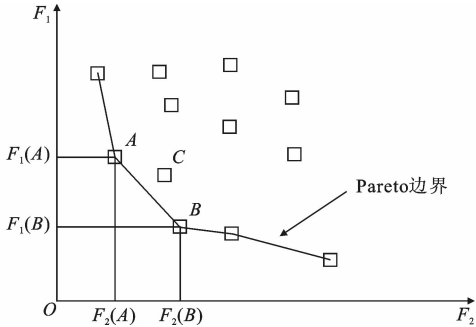


图 2 Pareto 多目标优化示意

Fig. 2 Sketch of Pareto multi-objective optimization analysis method

图 2 中: A 、 B 分别表示 2 个边界点; $F_1(A)$ 、 $F_2(A)$ 分别表示 A 点在 F_1 轴、 F_2 轴的数值;

$F_1(B)$ 、 $F_2(B)$ 分别表示 B 点在 F_1 轴、 F_2 轴的数值。即寻求以 F_1 和 F_2 最小为目标的情况下,离散点 C 不是此最优问题的非劣解,因为存在点 A 比点 C 在优化目标上绝对占优;而点 A 和点 B 都不能互相绝对占优,因此这 2 个点都是此最优化问题的非劣解。

2 算例

2.1 桥梁概况

以芜湖长江公路二桥为例,该桥主桥采用全漂浮分肢柱式塔四索面分离式钢箱梁斜拉桥,全长 1 622 m,跨径布置 (100 + 308 + 806 + 308 + 100) m。大桥采用公路-I 级、双向 6 车道标准,设计速度为 100 km/h。大桥主梁为分离式扁平流线形封闭钢箱梁,梁高约 3.5 m,宽 53 m,钢梁标准索距 16 m;主塔高 262.48 m (上部独柱、下部分肢),采用 C50 混凝土;采用四面拉索 (1 860 MPa 钢绞线)、同向回转拉索鞍座锚固体体系 (局部为齿板锚固),共 392 根拉索,其中拉索最长为 895.6 m、最短为 125.5 m。大桥桥跨及主梁断面、局部桥塔布置如图 3、图 4 所示。

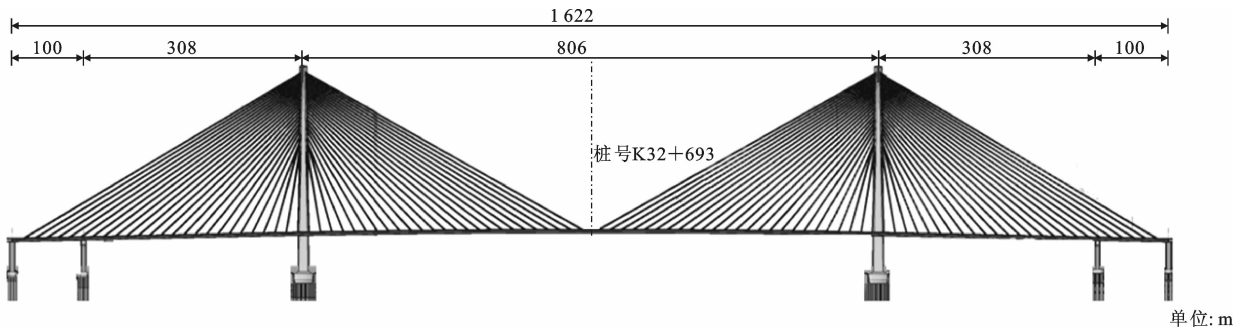


图 3 大桥桥跨布置示意

Fig. 3 Sketch of span arrangement of bridge

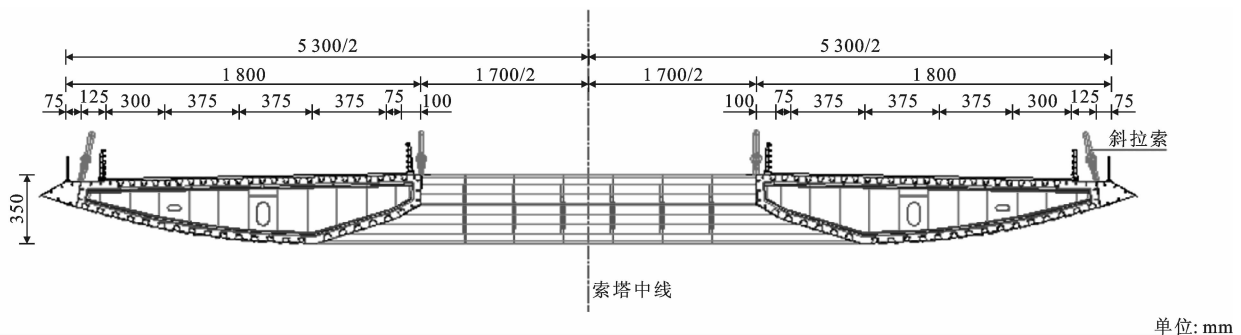


图 4 大桥主箱梁断面及局部分肢桥塔示意

Fig. 4 Sketch of box girder section and local tower of bridge

主梁按行车方向分为 2 幅独立箱梁,其中单幅箱梁两侧各设有斜拉索锚固点,斜拉索在塔顶采用

鞍座锚固系统,2 幅箱梁之间间隔 1 个梁段设置横梁连接。

2.2 有限元模型

采用有限元分析程序,考虑计算机内存及计算效率,用 Beam4 梁单元模拟塔/梁构件,用 Link10 桁架单元模拟拉索构件,拉索均以锚固桥塔模拟,如图 5 所示。参照相关规范^[28]对设计荷载进行横向及纵向折减,桥面铺装荷载取 37 kN/m。大桥部分拉索截面面积见表 1,拉索编号从 1# 或 2# ~ 25# 表示拉索长度逐渐增加。塔、梁约束以耦合命令(CP)模拟,见表 2。表 3 中:z 为竖向约束; Δx 、 Δy 、 Δz 分别为 x、y、z 方向的平动自由度; θ_x 、 θ_y 、 θ_z 分别为 x、y、z 轴的转动自由度;0 为自由无约束;1 为固定约束。

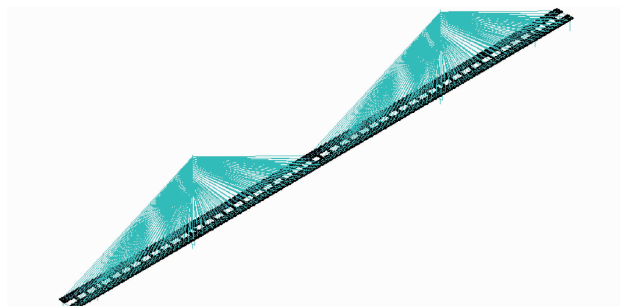


图 5 大桥有限元模型

Fig. 5 Finite element model of bridge

表 1 斜拉索截面面积

Tab. 1 Cross sections area of stay cables

面积/m ²	拉索编号			
	外侧边跨拉索	外侧中跨拉索	内侧边跨拉索	内侧中跨拉索
0.004 3	22#、24#、 25#		2#、18#	2#、16#、 20#、22#
0.004 6	20#、21#	23#、24#、25#		21#
0.003 8	18#、19#	9#、18#、20#	14#、15#、16#	17#
0.003 5	16#、17#	17#、19#	13#	13#、14#、15#
0.003 1	10#、11#、 13#、14#、15#	12#、13#、 14#、15#	10#、11#、12#	3#、9#、 11#、12#
0.002 7	12#	4#~8#、 10#、11#	6#~9#、 3#	7#、8#、10#
0.002 4	6#~9#、 2#、3#	2#、3#		6#
0.002 1	4#、5#		4#、5#	4#、5#
0.004 1	1#	1#、16#、 21#、22#	17#	18#、19#
0.005 5			23#、24#、25#	23#、24#、25#
0.006 0			21#、22#	
0.005 7			19#、20#	

2.3 初始状态索力

计算初始状态荷载作用下的拉索系统的索力变化可知:①拉索索力沿桥塔两侧变化趋势基本一致,

表 2 有限元模型边界约束

Tab. 2 Boundary constraints of finite element model

位置	Δx	Δy	Δz	θ_x	θ_y	θ_z
桥塔塔底	1	1	1	1	1	1
过渡墩、边墩墩底	1	1	1	1	1	1
过渡墩-梁连接	0	1	1	1	0	0
边墩-主梁连接	0	1	1	1	0	0
塔-主梁连接	0	1	0	0	0	0

内侧索力基本大于外侧索力,索力随索长增加呈现增加的趋势,其中 23#、24#、25# 拉索索力最大;②中跨拉索索力变化较复杂。中跨外侧 1#、9#,内侧 1#、2#、3# 及边跨外侧 1#,内侧 1#、2#、3# 拉索索力出现了突变,其中中跨内侧 9# 拉索索力显著小于外侧拉索索力。1/2 跨径的外侧拉索索力沿桥塔两侧分布和边跨拉索索力沿主梁两侧分布示意,如图 6、图 7 所示。

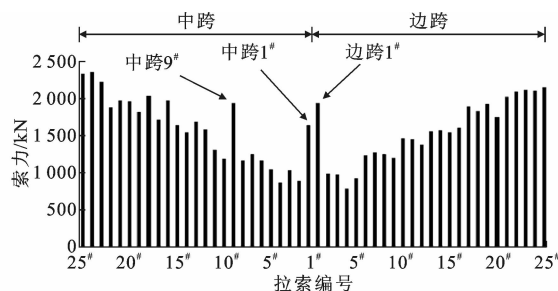


图 6 1/2 跨径外侧拉索索力沿桥塔分布

Fig. 6 Distributions of outside cable force along with bridge tower of 1/2 bridge span

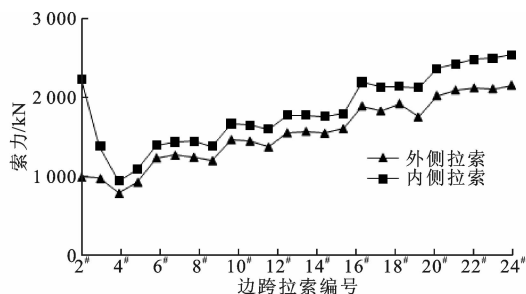


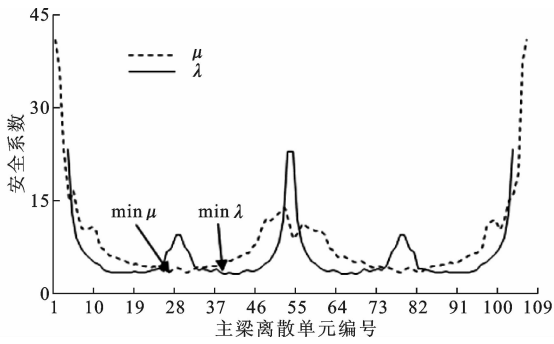
图 7 边跨拉索索力沿主梁内外侧分布

Fig. 7 Distributions of outside and inside cable force along with main girder of side-span

3 结果与讨论

以主梁屈曲安全系数 λ 和应力安全系数 μ 为性能评价指标,分别对拉索整体性能退化、单根断索以及横向单对断索 3 种情况下的主梁结构性能进行分析。恒载作用下主梁屈曲安全系数 λ 和应力安全系数 μ 如图 8 所示。

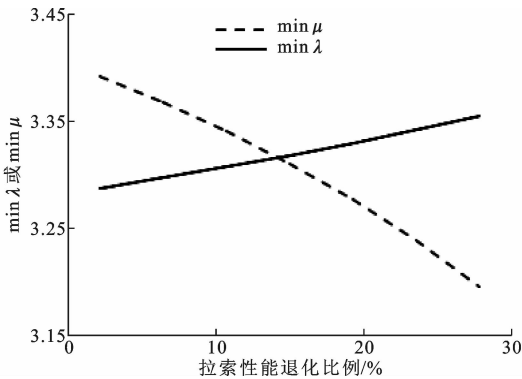
由图 8 可知:结构在初始状态荷载作用下, λ 和

图8 大桥主梁性能评价指标(λ, μ)变化Fig. 8 Changes of performance evaluation indexes (λ, μ) of main girder of whole bridge

μ 沿主跨跨中纵向对称;主梁最大应力为101.7 MPa,出现在梁塔交界区26号单元(边跨1[#]、2[#]拉索区),以345 MPa为应力限值时,主梁最小应力安全系数 $\min \mu$ 为3.39;主梁最小屈曲安全系数 $\min \lambda$ 为3.28,出现在主梁38号单元(中跨10[#]、11[#]拉索区),沿主跨跨中纵向对称。

3.1 整体性能退化

以拉索截面损失模拟其整体性能退化损伤情况,分别按照无损伤、损伤5%、损伤10%、损伤15%、损伤20%、损伤25%、损伤30%这7种工况进行分析。拉索整体性能退化时主梁 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 的变化曲线如图9所示。

图9 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 随拉索整体退化变化Fig. 9 Changes of $\min \lambda, \min \mu$ subjected to cable overall performance degradation

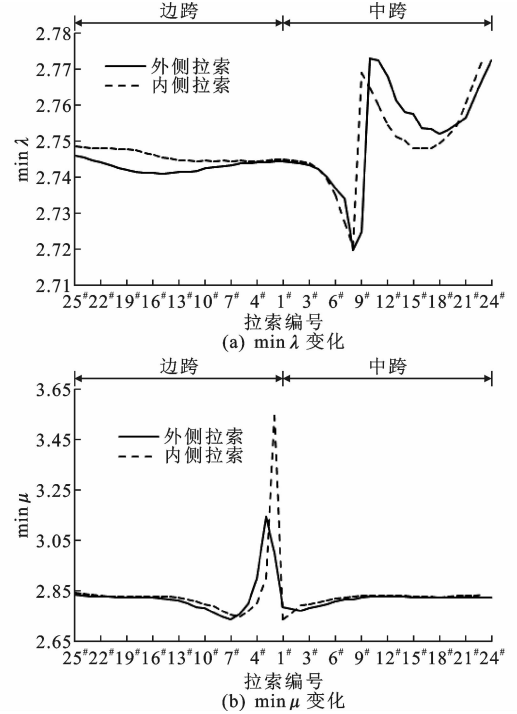
由图9可知,随着拉索整体性能从完好到退化30%,主梁的 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 总体变化不大,且基本呈线性变化。

3.2 单根断索

3.2.1 主梁 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 的变化

以内、外侧单根拉索失效模拟断索损伤场景,分别按拉索1[#]、2[#]、3[#]等共50种工况(外侧50根拉索、内侧48根拉索)进行分析。内、外侧单根断索时

主梁 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 变化如图10所示。

图10 单根断索时 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 的变化Fig. 10 Changes of $\min \lambda, \min \mu$ subjected to single cable fracture

由图10可知:内侧中跨10[#]拉索、外侧中跨9[#]拉索断裂时 $\min \lambda$ 最小,内侧中跨8[#]、9[#]拉索、外侧中跨8[#]、10[#]拉索影响相对较大;内侧中跨2[#]拉索、外侧边跨6[#]拉索断裂时 $\min \mu$ 最小,内侧中跨3[#]、边跨6[#]、7[#]以及外侧边跨5[#]、7[#]拉索影响相对较大。

3.2.2 主梁 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 时双目标优化损伤评价

以 $\min \lambda=3.28$ 和 $\min \mu=3.39$ 作为结构屈曲安全性能需求,分别计算外、内侧单根断索损伤场景下全桥主梁的最小的性能指数作为其 P_{DS} 。根据式(6)、式(7)计算各工况下的 C_{IDS} 和 M_{IDS} ,以 $(1-C_{IDS})$ 为横坐标,表示损伤性能指标,以 M_{IDS} 为纵坐标,表示面积损伤比例,绘制双参数曲线如图11~图12所示。其中:Z表示中跨,B表示边跨;Z9表示中跨9[#]拉索,B9表示边跨9[#]拉索,其他依次类推。

由图11可知:外侧、内侧中跨10[#]拉索单根损伤时,主梁屈曲安全系数最不利;外侧边跨4[#]~9[#]、12[#]和中跨5[#]~9[#]、3[#]拉索以及内侧边跨4[#]、5[#]、中跨4[#]~9[#]拉索损伤影响显著。由图12可知:内侧、外侧边跨6[#]拉索单根损伤时,主梁应力安全系数最不利;外侧边跨4[#]、5[#]、7[#]、8[#]、9[#]和中跨

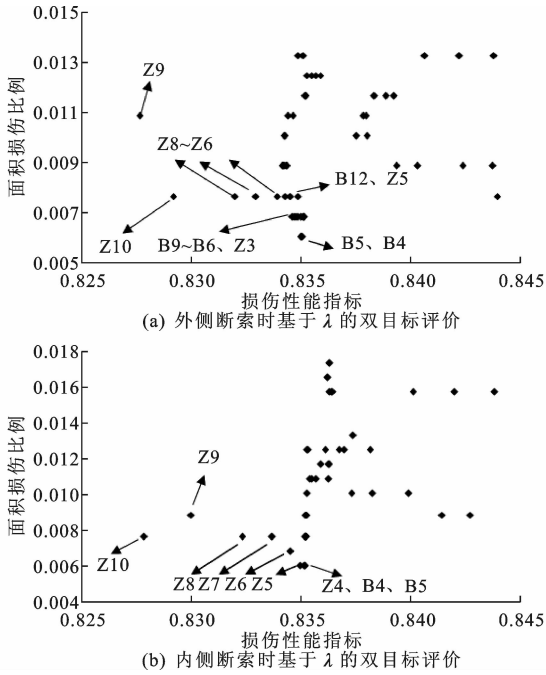


图 11 单根断索时基于 λ 的双目标评价

Fig. 11 Double-objective optimization based on λ subjected to single cable fracture

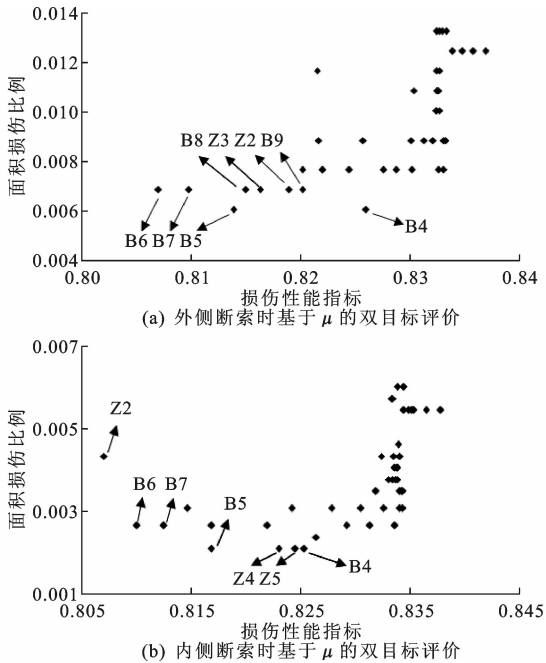


图 12 单根断索时基于 μ 的双目标评价

Fig. 12 Double-objective optimization based on μ subjected to single cable fracture

2[#]、3[#]及内侧边跨 4[#]、5[#]、7[#]和中跨 2[#]、4[#]、5[#]拉索损伤影响显著。

3.3 单对断索

3.3.1 主梁 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 变化

以内、外侧单对拉索失效模拟其单对断索损伤

场景,分别按照拉索 1[#]、2[#]、3[#]等 50 种工况进行分析。单对断索时主梁最小应力安全系数 $\min \mu$ 和最小屈曲安全系数 $\min \lambda$ 的变化曲线如图 13 所示。

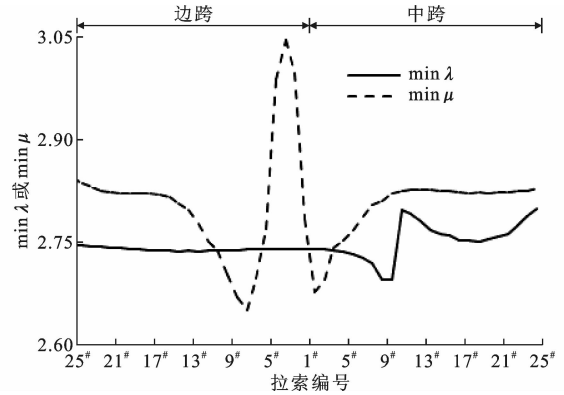


图 13 单对断索时 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 的变化

Fig. 13 Changes of $\min \lambda$, $\min \mu$ subjected to pair of cable fracture

由图 13 可知:内、外侧单对断索时,主梁 $\min \lambda$ 总体变化不大,其中中跨 10[#]拉索断裂时 $\min \lambda$ 最小,中跨 8[#]、9[#]拉索影响相对较大;主梁 $\min \mu$ 总体变化较大,其中边跨 6[#]拉索断裂时 $\min \mu$ 最小,边跨 5[#]、7[#]、8[#]拉索以及中跨 2[#]、3[#]拉索影响相对较大。

3.3.2 主梁 $\min \lambda$ 和 $\min \mu$ 时双目标优化损伤评价

以 $\min \lambda=3.28$ 和 $\min \mu=3.39$ 作为结构屈曲安全性能基本需求,分别计算内、外侧单对断索损伤场景的损伤性能指标 C_{IDS} 和面积损伤比例 M_{IDS} ,如图 14 所示。

由图 14 可知:中跨 10[#]拉索单对损伤时,主梁屈曲安全系数最为不利,边跨 1[#]、5[#]以及中跨 1[#]、4[#]~9[#]拉索对屈曲安全系数影响显著;边跨 6[#]拉索单对损伤时,主梁应力安全系数最为不利,边跨 4[#]、5[#]、7[#]以及中跨 1[#]、4[#]、5[#]拉索单对损伤对应力安全系数影响显著。

4 结 语

(1)恒载作用下,拉索设计索力沿索长逐渐增大,内侧索力基本大于外侧索力,其中 23[#]、24[#]、25[#]长拉索索力最大,近塔柱 1[#]、2[#]、3[#]拉索及中跨附近 9[#]拉索索力变化显著。

(2)拉索整体性能退化为 30%以内时,主梁性能影响较小,且其变化基本呈线性;单根断索时主梁最小屈曲安全系数及应力安全系数分别出现在内侧中跨 10[#]、外侧中跨 9[#]拉索及内侧中跨 2[#]、外侧边

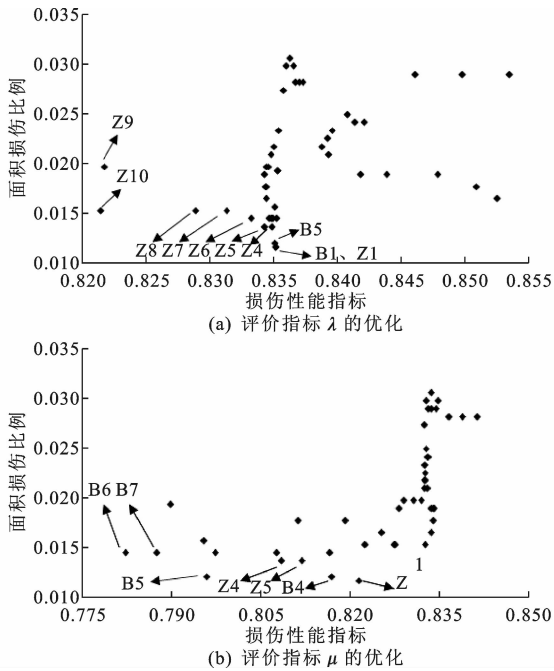


图 14 单对断索时 $(1-C_{ID_s})$ 和 M_{ID_s} 的双参数优化

Fig. 14 Double-objective optimization of $(1-C_{ID_s})$ and M_{ID_s} subjected to pair of cables fracture

跨 6[#] 拉索损伤场景,最易损伤场景为中跨 10[#] 拉索以及边跨 6[#] 单根断索,拉索 2[#] ~ 5[#] 及 7[#] ~ 9[#] 等较为易损;单对断索时主梁最小屈曲安全系数及应力安全系数分别出现在中跨 10[#] 和边跨 6[#] 拉索损伤场景。即最易损伤拉索为中跨 10[#] 及边跨 6[#] 单对断索,拉索 1[#]、4[#]、5[#]、7[#] 等较易损伤。

(3) 本文研究对全漂浮分肢柱式塔四索面分离式钢箱梁斜拉桥拉索易损部件研究,布设长期监测点,提高此类桥梁安全性能有重要意义。易损性分析时,采用的主梁屈曲安全系数为斜拉桥主梁面内稳定问题,下一步将开展计入宽钢箱主梁屈曲稳定性能指标的多性能指标下斜拉桥易损部位研究。

参考文献:

References:

[1] 李彦兵. 大跨径斜拉桥断索危害性研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
LI Yan-bing. Research of broken cable hazard for long scale cable-stayed bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2013.

[2] 马滔. 某斜拉桥断索事故及恢复过程的非线性分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.
MA Tao. The nonlinear analysis of cables broken accident and recovery state of a cable-stayed bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2015.

[3] 张益翔. 斜拉桥拉索损伤对桥梁结构性能的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.
ZHANG Yi-xiang. A study on the influence of cable damage on the structure performance of the cable-stayed bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2015.

[4] AGARWAL J, BLOCKLEY D I, WOODMAN N. Vulnerability of structural systems[J]. Structural Safety, 2003,25(3):263-286.

[5] 于刚,孙利民. 断索导致的斜拉桥结构易损性分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(3):323-328.
YU Gang, SUN Li-min. Vulnerability analysis of cable-stayed bridge due to cable failures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(3): 323-328.

[6] GREENSPON J E. Energy approaches to structural vulnerability application of the new Bell stress-strain laws[R]. Maryland: USA Ballistic Research Laboratories Aberdeen Proving Ground,1976.

[7] TASSIOS T P. The vulnerability concept revisited[J]. WIT Transactions on the Built Environment, 1995,15:343-352.

[8] LIND N C. A measure of vulnerability and damage tolerance[J]. Reliability Engineering and System Safety,1995,48(1):1-6.

[9] GHALI A, TADROS G. Bridge progressive collapse vulnerability[J]. Journal of Structural Engineering, 1997,123(2):227-231.

[10] STAROSSEK U. Typology of progressive collapse[J]. Engineering Structures,2007,29(9):2302-2307.

[11] BLANDFORD G E. Review of progressive failure analyses for truss structures[J]. Journal of Structural Engineering,1997,123(2):122-129.

[12] ABDELNABY A E. Fragility curves for RC frames subjected to Tohoku mainshock aftershocks sequences [J]. Journal of Earthquake Engineering,2018,22(5): 902-920.

[13] HWANG H, 刘京波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析[J]. 土木工程学报,2004,37(6):47-51.
HWANG H, LIU Jing-bo. Seismic fragility analysis of reinforced concrete bridges[J]. China Civil Engineering Journal,2004,37(6):47-51.

[14] 李立峰,吴文朋,黄佳梅,等. 地震作用下中等跨径 RC 连续梁桥系统易损性研究[J]. 土木工程学报,2012,45(10):152-160.
LI Li-feng, WU Wen-peng, HUANG Jia-mei, et al.

- Study on system vulnerability of medium span reinforced concrete continuous girder bridge under earthquake excitation[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(10):152-160.
- [15] 郑小博,赵煜,贺拴海,等.双塔钢桁斜拉桥结构强健性计算方法[J].交通运输工程学报,2017,17(5):27-38.
ZHENG Xiao-bo, ZHAO Yu, HE Shuan-hai, et al. Calculating method of structural robustness of double-tower cable-stayed bridge with steel truss girder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017,17(5):27-38.
- [16] 吴文朋,李立峰,邵旭东,等.基于性能的中等跨径混凝土斜拉桥抗震风险分析[J].中国公路学报,2015,28(3):52-59,116.
WU Wen-peng, LI Li-feng, SHAO Xu-dong, et al. Performance-based seismic risk analysis for medium-span concrete cable-stayed bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015,28(3):52-59,116.
- [17] WANG Z P, PANG Y T, YUAN W C. Fragility analysis of a continuous gird bridge subjected to a main-shock-after shock sequence considering deterioration [C]//ASCE. Proceedings of Structure Congress 2017: Bridges and Transportation Structure. New York: American Social Civil Engineers, 2017:36-47.
- [18] 林庆利,林均岐,刘金龙.汶川地震公路桥梁易损性研究[J].振动与冲击,2017,36(4):110-118.
LIN Qing-li, LIN Jun-qi, LIU Jin-long. A study on the fragility of highway bridges in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(4):110-118.
- [19] LI Y, SONG R, VAN DE LINDT J, et al. Collapse fragility of steel structures subjected to earthquake main shock-after shock sequences[J]. Journal of Structural Engineering, 2014,140(12):04014095.
- [20] 胡思聪,李立峰,王连华.基于易损性的高墩多塔斜拉桥纵向减震控制研究[J].振动与冲击,2017,36(22):149-157.
HU Si-cong, LI Li-feng, WANG Lian-hua. Seismic control for multi-span cable-stayed bridge with high piers using seismic fragility method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(22):149-157.
- [21] 胡思聪,李立峰,王连华.高墩多塔斜拉桥地震动强度指标选择及易损性评估[J].中国公路学报,2017,30(12):50-59.
HU Si-cong, LI Li-feng, WANG Lian-hua. Selection of optimal intensity measures of ground motions and seismic fragility assessment for multi-span cable-stayed bridge with tall piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017,30(12):50-59.
- [22] 钟剑,任伟新,万华平,等.两水准地震设防下的斜拉桥体系易损性分析[J].中国公路学报,2017,30(12):101-109.
ZHONG Jian, REN Wei-xin, WAN Hua-ping, et al. System fragility analysis for cable-stayed bridges under two level seismic hazard[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017,30(12):101-109.
- [23] HUANG J J, LI J, FRANCIS T K. Establishment of bridge rating systems for Ting Kau Bridge[R]. Hong Kong: Hong Kong University, 2010.
- [24] WONG K Y. Criticality and vulnerability analysis of Tsing Ma Bridge[C]//TRB. Proceedings of the International Conference on Bridge Engineering. Washington, DC: TRB, 2006:1-20.
- [25] 于刚.结构易损性分析及其在桥梁健康监测中的应用[D].上海:同济大学,2009.
YU Gang. Structural vulnerability analysis and its application in bridge health monitoring[D]. Shanghai Tongji University, 2009.
- [26] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社有限公司,2010.
LI Guo-hao. Stability and vibration of bridge structures[M]. Beijing: China Railway Publishing House Co. Ltd., 2010.
- [27] JTG/T D65-01-2007,公路斜拉桥设计细则[S].
JTG/T D65-01-2007, Guidelines for design of highway cable-stayed bridge[S].
- [28] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
JTG D60—2015, General specifications for design of highway bridges and culverts[S].